ТРЕНИЕ И ИЗНОС

УДК 621.833

В.Т. КОСТЫГОВ

КРИТЕРИЙ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлена новая концепция оценки противоизносных свойств смазываемых стальных поверхностей трения по величине и распределению микромеханических характеристик в тонком приповерхностном слое, оцениваемых субструктурным критерием Ks.

Ключевые слова: *трибосистема, интенсивность изнашивания, поверхность трения, градиент, рентгеноструктурный анализ, смазочный материал.*

Введение. Около 90% повреждений силовых трибосистем обусловлены контактной усталостью – наиболее опасной в условиях контактного взаимодействия с передачей рабочей циклической нагрузки (при скольжении, качении, проскальзывании и др). Например, в работе [1] при исследовании продуктов изнашивания по методике [2] в маслах тяжелонагруженных зубчатых передач трансмиссий путевых машин установлена усталостная природа образования частиц износа, поперечный размер которых не более 3 мкм и которые в дальнейшем проходят стадию окисления металлического железа до окиси (Fe_2O_3-гематит), закиси (FeO-вюстит) и закись-окиси железа (Fe_3O_4-магнетит). Такие частицы изнашивания могут образовываться только в результате возникновения и слияния закритических микротрещин под действием повторного деформирования дискретных микрообъемов приповерхностного слоя металла, вызванного дискретным контактированием участков поверхности трения. При этом необходимо отметить, что исследования тонких процессов разрушения, характерных для хорошо смазываемых поверхностей, недоступны для классических трибологических методов. Здесь процессы разрушения накапливаются и локализуются в тонких приповерхностных слоях на уровне субструктуры как отклик структурночувствительных параметров кристаллической решетки на внешнее воздействие. А это означает, что для решения трибтехнических проблем необходимо развивать и использовать методы исследования тонкой кристаллической структуры на **микро-** и **наноуровнях.**

Постановка задачи. В инженерных триботехнических расчетах узлов трения используются механические характеристики материалов, отражающие их объемные свойства, в то время как тонкие приповерхностные слои имеют свойства, значительно отличающиеся от объемных, в том числе и из-за влияния смазочных материалов. Поэтому в

основе недостатков существующих методов оценки износостойкости смазываемых поверхностей трения лежит фактическая неизученность микромеханических свойств и кинетики разрушения тонкого (до 3…8 мкм) приповерхностного слоя, деформируемого трением. Изучение процессов триборазрушения в тонких приповерхностных слоях является комплексной задачей микромеханики и трибологии, решаемой на микро- и наноуровнях. Решение этой задачи открывает новые пути для повышения ресурса машин при одновременном снижении затрат труда, средств и материалов в сферах производства и эксплуатации.

Методы исследований. Наиболее полно принципы подбора смазочных материалов для тяжелонагруженных узлов трения изложены в работах И.А. Буяновского и др. [3], где определяется режим трения по критерию $\lambda = h_{min} /(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)^{0,5}$, представляющему собой отношение минимальной толщины h_{min} смазочного слоя в зазоре между трущимися деталями к характеристикам высоты микронеровностей R_{a1} и R_{a2} рабочих поверхностей этих деталей, проверка работоспособности смазочного материала осуществляется по температурному критерию ($Q_{кр} > Q_{\Sigma}$).

С учетом большого числа однотипных смазочных материалов, при использовании которых указанные выше критерии могут совпадать или быть близкими по значению, нами предлагается качество служебных свойств смазочных материалов оценивать субструктурным критерием, однозначно характеризующим противоизносные свойства масел. При этом предполагается, что интенсивность изнашивания зависит не только от толщины разделяющего поверхности трения масляного слоя и его температурных параметров, но и от физико-химического состава смазочного материала. Таким образом, получается полная двуединая служебная характеристика смазочного материала. Первая обусловливает параметры трения в контакте, вторая – параметры изнашивания контактирующих поверхностей. Метод исследования включал триботехнические испытания на роликовой машине трения СМТ-2 по схеме «ролик-ролик» при контактных давлениях 740 МПа, суммарной скорости качения V_{Σ}=3,5 м/с и относительной скорости проскальзывания $V_{ск}$= 0,7 м/с, а также послойные рентгенографические исследования тонкого приповерхностного слоя стальных образцов с использованием модернизированной Дебаевской камеры РКД, где были изменены диафрагмирующая система, шкала отсчета углов, стопорное устройство. В результате рентгеновский пучок, пройдя коллимационное устройство, под строго фиксированным углом падал на исследуемую поверхность образца.

Реализация исследований и обсуждение результатов. Рентгеноструктурному исследованию состояния структуры стали в тонком приповерхностном слое до и после триботехнических испытаний подвергались металлические образцы из сталей 25ХГТ и 18Х2Н4МА, которые имеют справочные механические характеристики: по напряжению текучести $\sigma_т$ - 1100 МПа и 850 МПа и по пределу выносливости $\sigma_в$ - 1500

МПа и 1150 МПа соответственно. Твёрдость поверхностей трения образцов после нитроцементации, закалки и низкого отпуска составляла 58…60 HRC при шероховатости R_a=1,25 мкм. Микроструктура образцов обеих сталей у поверхности практически одинакова - это мелкоигольчатый мартенсит, иногда со следами остаточного аустенита, количество которого уменьшается по глубине, что соответствует параметрам материала реальной зубчатой передачи.

Противоизносные свойства материалов исследовались на машине трения типа СМЦ-2 по схеме «ролик-ролик» при контактных давлениях 740 МПа, суммарной скорости качения V_{Σ}=3,5 м/с и относительной скорости проскальзывания $V_{ск}$= 0,7 м/с. Такие нагрузочно-скоростные режимы трения адекватны наиболее характерным режимам трения в реальной зубчатой передаче осевых редукторов путевых машин тяжелого типа АДМ при скорости движения 40 км/ч с грузом на платформе.

Результаты триботехнических испытаний указанных сталей в трансмиссионных маслах ТАП-15В, ТСп-14гип и в масле по ТУ 32ЦТ-551-84 представлены на рис.1.

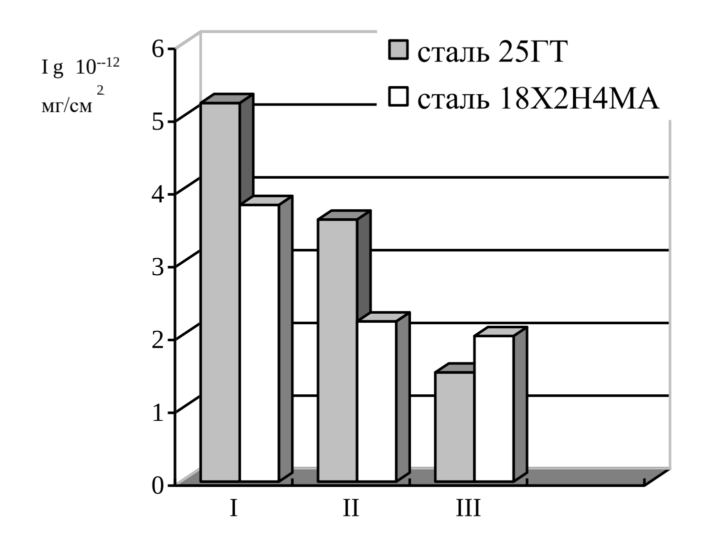


Рис. 1. Интенсивность изнашивания образцов в маслах:
I- масло по ТУ 32ЦТ-551-84 ; II-ТСп-15гип; III-ТАП-15В

Дифрактометрические исследования вновь изготовленных металлических образцов показали, что поверхностные слои сталей 25ХГТ и 18Х2Н4МА в исходном состоянии имеют весьма высокие плотности дислокационных скоплений, которые экспоненциально убывают по глубине исследуемого слоя в 8 мкм (рис. 2 и 3, кривые 1).

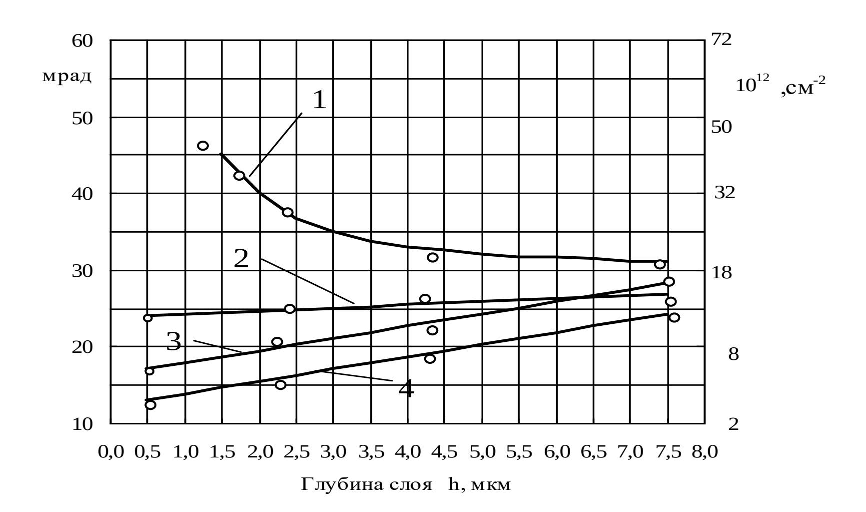


Рис. 2. Изменение ширины рентгеновских линий β (220) α-фазы и плотности дислокаций ρ по глубине стали 25ХГТ до (1) и после трения в маслах ТАП-15В (2), ТСп-14гип (3) и по ТУ 32ЦТ-551-84 (4)

Такая дислокационная картина приповерхностных слоев сталей в исходном состоянии отражает пропорциональное изменение микромеханических характеристик стали в исследуемом слое. Анализ рис. 2 и 3 показывает, что в исходном состоянии приповерхностные слои обеих сталей имеют значительный отрицательный градиент механических свойств по глубине приповерхностного слоя, что объясняется наклепом в приповерхностном слое после дробеструйной обработки поверхностей зубьев и адекватных роликовых образцов.

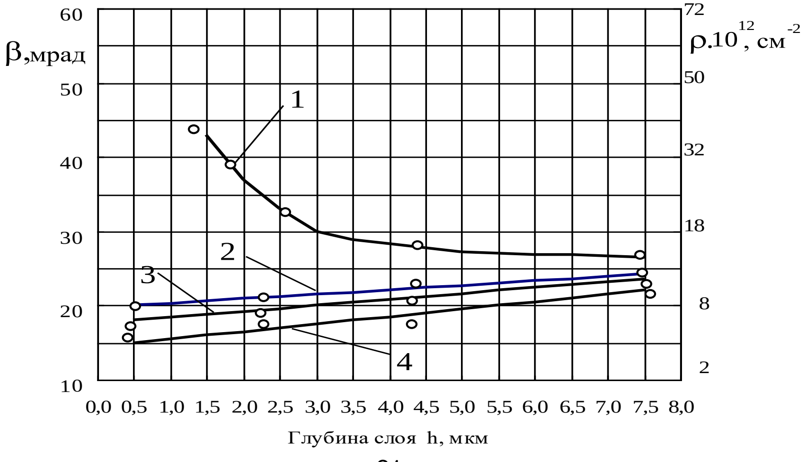


Рис. 3. Изменение ширины рентгеновских линий β (220) α-фазы и плотности дислокаций ρ по глубине стали 18Х2Н4МА до (1) и после трения в маслах: ТАП-15В (2), ТСп-14гип (3) и по ТУ 32ЦТ-551-84 (4)

Проведенные исследования [1] кинетики структурного состояния приповерхностных слоев материала при трении дают практическую возможность на основании экспериментальных данных рентгенографического анализа определять истинные локальные напряжения течения в деформируемых трением приповерхностных слоях сталей.

$$\sigma_{т(h)} = \mu \cdot G \cdot b \cdot \rho^{0,5} ,$$

где $\sigma_{т(h)}$-истинные значения предела текучести в исследуемом микрообъеме; μ - коэффициент; G -модуль сдвига; b - вектор Бюргерса; ρ - плотность дислокаций в исследуемом микрообъеме.

Метод определения плотности дислокаций ρ основан на квадратичной зависимости ρ от ширины рентгеновских линий β.

$$\rho = A \cdot \beta^2,$$

где А – коэффициент, зависящий от упругих свойств материала, характеристик дислокации (вектор Бюргерса). Для Al, W, Mo, Fe и их сплавов $A \approx 2 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

Различия в состояниях структур сталей 18Х2Н4МА и 25ХГТ в исходном состоянии заключаются в том, что на глубине относительной стабилизации структурных параметров около 6 мкм плотность дислокаций у стали 25ХГТ выше (кривая 1 на рис. 2), чем у стали 18Х2Н4МА (кривая 1 на рис.3). Эти различия, по-видимому, связаны с различием химсоставов сталей, обуславливающих и различные прочностные характеристики исследуемых приповерхностных слоев сталей при одинаковых режимах механической и химико-термической обработки образцов.

После восьми часов испытаний в трансмиссионных маслах ТАП-15В, ТСп-14гип и по ТУ 32ЦТ-551-84 приповерхностные слои образцов вновь подвергались рентгеноструктурному исследованию. Как видно из рис. 2 и 3, качественная картина изменения ширины рентгеновских линий β (220) α-фазы и соответствующих им плотностей дислокаций ρ для обеих сталей схожа. Все трансмиссионные масла после 8 часов испытания способствовали изменению дислокационной картины в тонких приповерхностных слоях сталей 18Х2Н4МА и 25ХГТ, а именно: дислокационные плотности и соответствующая им механическая прочность снизились. Во всех случаях приповерхностные слои стальных образцов приобрели положительные градиенты механических свойств, что минимизирует когезионные, объёмные вырывы с поверхностей трения при возможных прорывах масляной пленки и схватывании поверхностей трения.

Из приведенных исследований видно, что чем больше масляная среда влияет на снижение микромеханических характеристик в тонком приповерхностном слое стали, тем больше износ поверхности. Кроме того,

изменение состояния структуры при трении распространяется на разную глубину в приповерхностном слое, т.е. каждому смазочному маслу соответствует характерный только для этого масла градиент изменения состояния структуры. Следовательно, градиент изменения состояния структуры в приповерхностном слое стали, выраженный через ширину рентгеновских линий β, является устойчивой оценочной характеристикой влияния внешней среды на распределение микромеханических характеристик материала в приповерхностном слое стали, деформируемом трением.

На рис. 4 представлены обобщенные зависимости характерных изменений ширины рентгеновских линий по глубине активного приповерхностного слоя стали после трения в смазочных маслах с разной химической активностью.

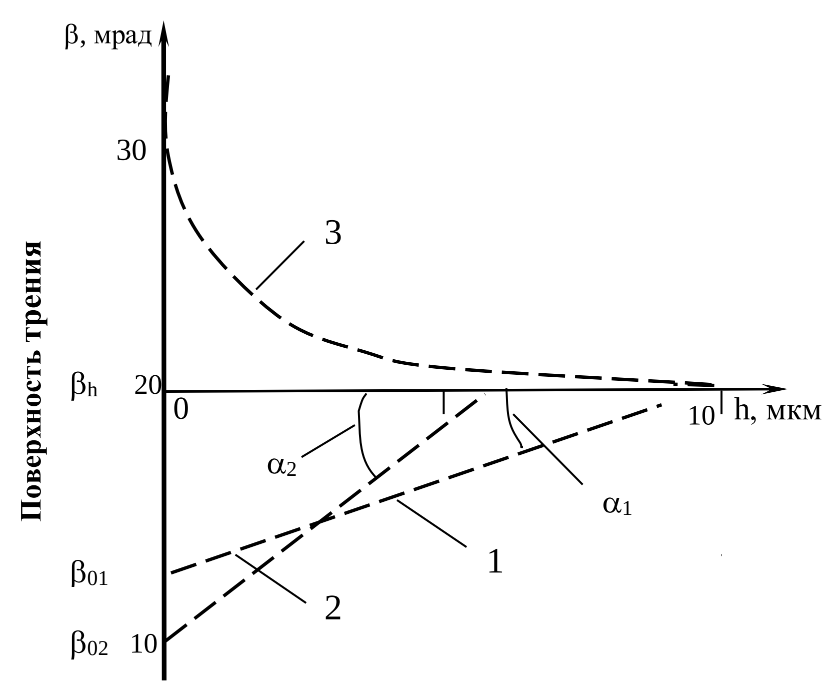


Рис. 4. Обобщенная зависимость характерных изменений ширины рентгеновских линий β по глубине приповерхностного слоя h стальных образцов: 1 и 2 – после трения в смазочных маслах с разной химической активностью; 3- в исходном состоянии перед трением

Здесь β_h соответствует ширине рентгеновских линий на максимальной глубине $h_в$ физико-химического влияния трибопроцессов в контакте. Ниже этого слоя трибопроцессы в контакте не изменяют состояние структуры стали; β_{01} и β_{02} соответствуют ширине рентгеновских линий на минимальном идентифицируемом расстоянии от поверхности после трения одинаковых стальных образцов в смазочных маслах, имеющих разную химическую активность при равных нагрузочно-скоростных параметрах трения.

Очевидно, что эти графики (прямая 1 и прямая 2 на рис. 4) соответствуют градиентам изменения состояния структуры приповерхностных слоев сталей в зависимости от свойств используемого масла, а углы α_1 и α_2 между нормалью к поверхности и направлением изменения ширины рентгеновских линий β_{01} и β_{02} характеризуют количественную величину этих изменений. Таким образом, изменение ширины β рентгеновских линий, глубина влияния внешней среды h и угол α полностью отражают физико-химическое влияние смазочного масла на изменение микромеханических характеристик приповерхностного слоя, деформированного трением.

Это позволяет получить критерий структурного состояния (Ks), который отражает влияние физико-химических процессов в смазываемом трибоконтакте на накопление и распределение несовершенств в кристаллической решетке (износоусталостные процессы) приповерхностного слоя, деформируемого трением:

$$Ks = \beta_h/(\beta_o \cos\alpha) .$$

Результаты триботехнических и рентгенографических исследований, (см. рис.1-3) сведены в таблицу, где приведены также численные величины субструктурного критерия Ks.

Результаты триботехнических
и рентгенографических исследований

№ п/п	Сталь	Смазочные масла	β_o, мрад	β_h мрад	Ks	$J_g \cdot 10^{-12}$
1	25ХГТ	ТУ 32-ЦТ-551	13	30	2,347	5,2
2		ТСп-14гип	17		1,791	3,6
3		ТАП-15В	24		1,251	1,5
5	18Х2Н4МА	ТУ 32-ЦТ-551	15	25	1,676	3,8
6		ТСп-14гип	18		1,395	2,2
7		ТАП-15В	20		1,262	1,9

Для анализа связи между интенсивностью изнашивания стальных образцов в различных маслах и состоянием структуры в тонких приповерхностных слоях, выраженным через критерий структурного состояния этих образцов, были построены графики зависимости между этими параметрами (рис. 5).

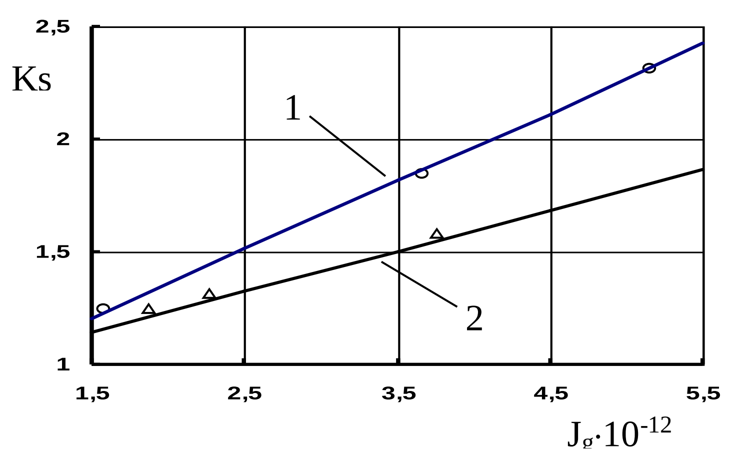


Рис. 5. Связь между критерием структурного состояния Ks и интенсивностью изнашивания J_g образцов из стали 25ХГТ (1) и 18Х2Н4МА (2) в различных трансмиссионных маслах

Из рис.5 видно, что интенсивность изнашивания сталей связана прямой зависимостью с критерием структурного состояния, при этом зависимости эти индивидуальны для каждой стали, что видно также из результатов триботехнических испытаний (см. рис.1) и рентгенографических исследований (см. рис.2 и 3). Совершенно очевидно, что тонкая кристаллическая структура приповерхностного слоя стали 25ХГТ более чувствительна к марке используемого смазочного материала по сравнению со структурой стали 18Х2Н4МА, что объективно отражается на интенсивности изнашивания.

Одним из главных достоинств критерия субструктурного состояния является то, что он однозначно отражает величину и знак градиента механических свойств (напряженного состояния структуры) в приповерхностном слое стали. Так, при $\beta_h > \beta_0$ критерий Ks > 1. При равенстве значений ширины рентгеновских линий как на глубине β_h, так и у поверхности β_o критерий Ks =1. Для случая, когда в приповерхностном слое $\beta_h < \beta_o$, критерий Ks < 1. Отсюда видно, что при значении критерия Ks > 1 приповерхностный слой металла имеет положительный градиент механических свойств, а при Ks < 1 - отрицательный.

Следовательно, наиболее предпочтительным значением критерия структурного состояния (Ks) будет единица, когда градиент изменения механических свойств по глубине приповерхностного слоя будет равен нулю. Такое значение этого критерия указывает на отсутствие отрицательного градиента механических свойств в этом слое металла, что исключает когезионные вырывы фрагментов поверхности в условиях металлической связи при прорыве масляной пленки. С другой стороны, Ks =1 обеспечивает максимально высокие механические характеристики поверхности трения в области положительных градиентов механических свойств, препятствующих повышенному механохимическому износу. Такие качественные характеристики приповерхностного слоя могут быть

достигнуты за счет оптимального подбора активных присадок к базовым маслам для конкретных сталей и режимов трения. Разработанное нами смазочное масло хотя и обеспечивает самый низкий износ поверхностей трения образцов из стали 25ХГТ, но имеет еще резервы в улучшении противоизносных характеристик..

Таким образом, роль смазочного масла в трибопроцессе заключается также и в том, что физико-химическое взаимодействие масла с поверхностью не позволяет накапливаться упругой энергии в тонком приповерхностном слое путем облегчения выхода дислокаций на поверхность, при этом микротрещины могут аннигилировать. Происходит циклическая релаксация напряжений в приповерхностном объёме металла, деформированного трением.

Выводы. С использованием методов исследования процессов трибoразрушения на **микро-** и **нано**уровнях разработана новая концепция оценки интенсивности изнашивания смазываемых стальных поверхностей трения по величине и распределению микромеханических характеристик в приповерхностном слое, деформируемом трением.

Предложен диагностический параметр износоусталостных процессов, которым является формируемый градиент микромеханических прочностных характеристик в приповерхностном слое стальных деталей в результате трения, выраженный через критерий структурного состояния Ks. Данный критерий может быть использован для оценки противоизносных и противозадирных свойств смазочных масел. Смазочные масла с высокими противоизносными характеристиками формируют в приповерхностном слое минимальные положительные градиенты микромеханических свойств.

Библиографический список

1. Костыгов В.Т. Оценка износостойкости смазываемых трибосопряжений по микромеханическим характеристикам приповерхностного слоя: Автореф. … дис. д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 2003. - 38 с.

2. Филипнова Н.А. Фазовый анализ руд и продуктов их переработки. 2-е изд. - М.: Химия, 1995. - 253 с.

3. Буяновский И.А., Захаров С.М. Смазка. // Основы трибологии. - М.: Машиностроение, 2001. - С.270-352.

Материал поступил в редакцию 29.11.06.

V.T.KOSTYGOV

CRITERION ANTIWEAR CHARACTERISTICS OF LUBRICATION OILS

It was suggested a new conception of identification of wear intensity of lubricated steel friction surfaces by size and distribut6ion of micromechanical characteristics in thin undersurface level, deformated by friction. Suggested criterion characterize antiwear features of lubrication oils.

КОСТЫГОВ Василий Тихонович (р.1951), доктор технических наук, профессор (2003) кафедры «Транспортные машины и триботехника» Ростовского-на-Дону государственного университета путей сообщения. Окончил РИИЖТ (1975).
Научное направление - микромеханика трибoразрушений поликристаллических материалов.
Автор более 86 научных публикаций.